

## Bi12SiO20エピタキシャル薄膜を用いた空間光変調器に関する研究

著者	長尾 康之
号	1525
発行年	1994
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10332">http://hdl.handle.net/10097/10332</a>

氏 名	なが お やす ゆき 長 尾 康 之
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 6 年 10 月 12 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 56 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電子工学 専攻前期課程 修了
学 位 論 文 題 目	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ エピタキシャル薄膜を用いた 空間光変調器に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 伊藤 弘昌    東北大学教授 川上彰二郎 東北大学教授 内田 龍男    東北大学教授 福田 承生

## 論 文 内 容 要 旨

本論文は BSO エピタキシャル薄膜を用いた空間光変調器に関する一連の研究成果をまとめたものであり、その主眼とするところは、電気光学結晶  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) を用いて、より高い空間分解能を有し、しかも高速の消去動作が可能な空間光変調器を開発することである。本目的の実現のために、本論文では、動作特性の解析に基づいて新しい BSO 空間光変調器の構造として薄型型を提案した。また、提案した薄膜型 BSO 空間光変調器を実現するために欠かせない構成材料である、低抵抗 P ドープ BSO 単結晶、BSO エピタキシャル薄膜、および  $\text{BaO-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  4 成分系絶縁膜の作製技術を確認し、これらの材料の諸性質を明らかにした、さらに、これらの研究成果を踏まえて提案した構造の空間光変調器の試作を行い、従来型の BSO 空間光変調器を上回る性能を有することを実証した。

本論文の各章の要点および主要な結論を以下に述べる。

第 2 章では、より高い空間分解能を有し、しかも高速の消去動作が可能な BSO 空間光変調器の設計を目的とし、新しい BSO 空間光変調器の構造として BSO エピタキシャル薄膜を用いた薄膜型を提案し、その動作特性の従来型との比較検討、ならびにこの構造を実現するための技術的課題の検討を行っている。

まず、従来型の BSO 空間光変調器の動作原理と現在までに提案されている特性解析方法について

て、その概要を述べる。次いで、空間光変調器の構造および構成材料の物性定数をパラメータとした特性解析により、定量的な性能予測とパラメータの最適化を行っている。その結果、分解能向上の条件は絶縁膜の比誘電率を大きくすること、および絶縁膜とBSOの厚さを薄くすることであるが、印加電圧と絶縁破壊強度の関係から絶縁膜の薄化は制限され、主に絶縁膜の比誘電率とBSOの厚さに依存することを明らかにする。さらに、分解能の向上には絶縁膜の厚さ $\sim 10\mu\text{m}$ 、比誘電率 $\sim 30$ かつBSOの厚さ $20\mu\text{m}$ 以下が最適値であり、比誘電率30のとき従来型との性能比較で分解能を3.7倍以上に向上できることを示す。

次に、最適化したパラメータを導入するための空間光変調器の構造を検討し、従来型の欠点である「分解能の不足」と「消去光の必要性」を同時に解決できる可能性を持つ新しい構造として、低抵抗基板上のエピタキシャル薄膜を書き込む像の受光と蓄積、および読み出し光の変調を行う活性層として用いる薄型構造を提案する。さらに、この構造を実際に作製するためには、基板用の低抵抗BSO単結晶、BSOエピタキシャル薄膜、および高誘電率・高耐電圧絶縁膜の作製技術を確立する必要があることを示す。

第3章では、前章で提案した薄膜型BSO空間光変調器においてBSO薄膜のエピタキシャル成長基板用として必要な低抵抗BSO単結晶作製技術の確立を目的とし、チョクラルスキー法による結晶成長における不純物添加と成長条件の検討を行い、さらに成長した結晶の電気・光学的特性の評価と不純物添加による低抵抗化の機構を検討している。

まず、BSO単結晶に種々の元素を不純物として添加した場合、Pが低抵抗化に最も有効であることを明らかにする。次いで、PドープBSO単結晶は非ドープ結晶よりも熱歪みに弱いため、良質結晶の成長には引き上げ方向を $\langle 111 \rangle$ 方向とし、固液界面を下方に凸の一定形状に保つように炉内温度分布と引き上げ軸回転速度を制御することが重要であることを示す。BSOの電気的特性として1～5 mol.%のPドナーをドーピングすることにより6～7桁暗抵抗率が減少することを示し、Pドナー（深さ $E_d \sim 0.8\text{eV}$ ）添加によるフェルミ準位の上昇で空の電子トラップが減少するため、低印加電圧で注入電子によりトラップが完全に充填されて自由電子の実効的移動度が急増するのが低抵抗化の機構であることを明らかにする。さらに、最適化した成長条件で得られてたPドープBSO単結晶は、光学的に均一かつ48dB以上の消光比を有し、空間光変調器の作製に十分な品質であることを示す。

第4章では、第2章で提案した薄膜型BSO空間光変調器において、入力像を受光・蓄積し、また読み出し光を変調する活性層として必要なBSOエピタキシャル薄膜作製技術の確立を目的とし、有機金属化学気相成長法による作製条件の検討とBSOエピタキシャル薄膜の諸特性の評価を行っている。

まず、これまでに試みられたエピタキシャル成長法が、薄膜型BSO空間光変調器にそのままでは適用できないことを述べ、アルキルビスマス（TMBi, TEBi）とシリコンアルコキサイド（TMOSi, TEOSi）を原料に用いた有機金属化学気相成長法が成長の制御性に優れているため有効であることを示す。本方法で成長したBSO薄膜はチョクラルスキー法で成長したバルク結晶と違い、広い組成範囲にわたって $\gamma\text{-Bi}_2\text{O}_3$ と $\text{Bi}_{20}\text{SiO}_{20}$ の混晶 $\text{Bi}_{12}(\text{Bi}^{3+}_{0.5}\text{Bi}^{5+}_{0.5})_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_{20}$  ( $0 \leq x \leq 1$ )

となり、組成 $0.7 < \chi \leq 1$ の薄膜がBSO基板にエピタキシャル成長することを明らかにする。

次に、BSO薄膜に要求される条件は $10\mu\text{m}$ 以上の膜厚およびその膜厚での良好な表面モロロジー、組成・膜厚均一性、結晶性、光導電特性であるが、表面モロロジーを最も重視する必要があることを述べ、表面モロロジーが最良となる成長条件は、酸化ガスおよびBi原料に $\text{O}_2$ およびTMBiを用いた減圧成長で成長温度 $700^\circ\text{C}$ 以上、 $\text{O}_2$ 分圧 $6 \sim 8\text{ Torr}$ 、平均流速 $42.5\text{ cm/s}$ 以上であることを示す。この条件で成長したBSO薄膜は、エピタキシャル成長する組成限界( $\chi = 0.7$ )でもX線回折半値全幅が基板の3倍以下と良好な結晶性であり、膜圧および組成の均一性も要求条件をほぼ満たしている。さらに、BSO薄膜の光導電性はバルク単結晶よりも大きく、酸化ガスとして $\text{O}_2$ を用いた場合により良い特性を得られること、および、組成により波長依存性が変化するために、BSO空間光変調器の感度特性の設計自由度が大きくなることを示す。

第5章では、第2章で提案した薄膜型BSO空間光変調器において必要とされる高耐電圧・高誘電率絶縁膜の作製技術の確立を目的とし、諸要求条件を満足できる可能性を有した絶縁膜材料を選択し、高周波マグネトロンスパッタリングによる作製条件の検討と作製した絶縁膜の特性評価を行っている。

まず、絶縁膜に要求される条件として第2章で示した電気的特性に関する条件である高絶縁破壊強度と高誘電率の他に、BSO単結晶との線膨張係数の差が小さいことも重要な条件であることを述べ、線膨張係数が大きくBSO単結晶上に $10\mu\text{m}$ 程度の膜厚まで堆積可能な $\text{BaO}-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 4成分系膜が適していることを明らかにする。次いで、高周波マグネトロンスパッタリングによる $\text{BaO}-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 4成分系絶縁膜の作製においてスパッタリングガス中の $\text{O}_2$ 量が最も絶縁破壊強度に強く影響を及ぼすことを述べ、最適 $\text{O}_2$ 量である約20%の条件では、 $[\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2] = 60 \sim 65\text{ mol.}\%$ 、 $[\text{SiO}_2]/[\text{Al}_2\text{O}_3] = 3 \sim 5$ なる組成で目標とした比誘電率30を達成でき、絶縁破壊強度は約 $3 \times 10^6\text{ V/cm}$ であることを示す。また、この組成領域の膜構造をX線回折、走査型電子顕微鏡観察、並びに誘電特性の周波数依存測定を用いて調べ、非晶質であることを明らかにする。

第6章では、第2章で提案した薄膜型BSO空間光変調器の動作および特性を実験的に確認することを目的とし、第3章から第5章で述べた低抵抗BSO単結晶、BSOエピタキシャル薄膜、および高誘電率絶縁膜の研究成果を踏まえて薄膜型BSO空間光変調器の試作と動作特性の評価を行っている。

まず、試作した平行平板型のインコヒーレント光用とウェッジ型基板による干渉偏除去法を用いたコヒーレント光用の空間光変調器の構造について述べ、その作製工程を示す。次に、試作した空間光変調器の動作特性を示す。書き込み感度は、吸収端波長 $\lambda_g = 380\text{ nm}$ 付近で最大となるが、読み出しに用いる波長 $\lambda_r > 550\text{ nm}$ ではBSOエピタキシャル薄膜の組成により数桁の感度差があり、 $\chi = 1.0$ の薄膜は読み出し光強度を増してS/N比の良い像が得られ、 $\chi < 1$ の薄膜では書き込みに可視光を使用する応用に有利であることを示す。コントラスト比は、バイアス電圧の2乗に比例して増大して1000 : 1以上の値が得られること、また、分解能は露光量に依存するが従来型の2～3倍に相当する $50\text{ lp/nm}$ 以上であることを明らかにする。さらに、コヒーレント読み出し光用のウェッ

ジ型空間光変調器の感度および分解能は、基板厚に依存せず一定で、面内で感度と分解能が不均一になるという従来型のウェッジ型空間光変調器における問題を薄膜型構造を採用することで解決できることを示す。消去動作は、第2章で設計したとおりデバイス電圧のスイッチングだけで可能であり、室内照明程度の弱い可視光を補助照射して動作させると、TVフレームレートでの書き込み・消去の繰り返し動作が可能であることを明らかにする。

以上のように、本論文ではBSO空間光変調器の高性能化を達成する方法として薄膜型構造を提案するとともに、構成材料として必要な基板用低抵抗BSO単結晶、BSOエピタキシャル薄膜、および高誘電率・高耐電圧絶縁膜の作製技術を確立して薄膜型BSO空間光変調器の試作を行い、従来型のBSO空間光変調器を上回る動作特性を有することを実験的に示した。本研究で開発した空間光変調器は、高分解能であり、しかも高コントラストであるため、アナログ的並列光情報処理への応用において最も処理の高品位化を可能とするものである。今後、本論文に示した研究成果がBSO結晶の物性研究や電気光学結晶を用いた空間光変調器の高性能化の研究に1つの指針を与え、また、並列光情報処理技術の発展に寄与するものと期待する。

## 審 査 結 果 の 要 旨

光波が本来的に有する高速性及び並列性を利用した、各種光デバイスの研究開発が活発に行われている。空間光変調器は2次元光情報の並列処理に不可欠なデバイスであるが、分解能や処理速度において不十分な点が多く、高性能化の研究開発が進められている。著者は、早期からこの研究に取り組み、電気光学結晶  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) のエピタキシャル薄膜を用いた新構造の薄膜空間光変調器の提案と、その実現に必要な結晶成長をはじめとするプロセス技術確立し、その試作を行い、優れた特性を有する空間光変調器を実現した。

本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、全文7章より成る。

第1章は序文である。

第2章では、BSOを用いた空間光変調器の高性能化について検討した結果を述べている。即ち、分解能の向上にはBSOの厚さを $20\mu\text{m}$ 以下に薄くし、絶縁膜の比誘電率を30程度と大きくすることが有効であることを明らかにした。また構造を検討し、消去光不要の動作が可能な新構造を提案している。この空間光変調器の実現には、(1)基板用低抵抗BSO単結晶成長、(2)BSOのエピタキシャル薄膜成長、および(3)高誘電率・高耐電圧絶縁膜の作成技術の確立が必要なことを示している。

第3章では、基板用の低抵抗BSO単結晶がPを1～5mol.%ドーピングするより得られることと、その低抵抗化の機構を明らかにしている。また、得られた結晶が消光比48dB以上と光学的均一性にも優れていることを示している。

第4章では、入力像を受光・蓄積し、また、読出光の変調を行う活性層のBSOエピタキシャル薄膜の、MO-CVD法による成長を述べている。良好な光導電特性や表面モロロジー、結晶性、組成・膜厚均一性が得られる成長条件を明らかにしている。また第5章では、高誘電率と高耐電圧特性を兼ね備え、かつBSO結晶との線膨張係数差の小さな絶縁膜として、マグネトロンスパッタリング法により作製した $\text{BaO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ の4成分膜が適していることを示している。

第6章では、第3～5章に述べた構成材料に関する研究成果を踏まえて、エピタキシャル薄膜型BSO空間光変調器を試作し、動作特性を測定評価している。その結果、分解能 $50\text{lp/mm}$ 以上、コントラスト比1000:1以上の特性と、バイアス電圧制御による消去動作が述べられている。これは、実用上重要な知見である。

第7章は、まとめである。

以上要するに本論文は、2次元光情報の処理に重要な高性能な空間光変調器の構造提案と、そのための結晶成長およびプロセス技術を開発して空間光変調器を試作し、その動作を実証したもので、光エレクトロニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。